



# 物体検出アルゴリズムを用いた 異物除去装置の開発

AUTHOR

安田 真也 YASUDA Shinya

## 要旨

## ABSTRACT

近年、リサイクル原料や樹脂ペレット、農産物など各種粒状材料において、異物の混入が品質・安全性・設備トラブルの観点から問題となっている。これらの現場では、ベルトコンベヤ上を流動する粒状材料(以下、「バラ物」と称する)から人手により異物を選別・除去する作業が広く行われているが、作業負荷が高く、選別精度は作業者の熟練度に依存しやすいことから、自動化・省人化のニーズが高まっている。

本報告では、ベルトコンベヤ上を搬送される粒状材料をカメラで撮像し、取得画像を入力として物体検出アルゴリズムを適用することで、材料中に混入した異物の位置を検出する。その検出座標に基づいて吸引ノズルを制御する異物除去装置の開発について述べる。特に、カメラ画像上で得られた検出座標をコンベヤ座標系およびエンコーダパルスへ変換し、画像処理時間や通信時間を考慮しつつ、適切なタイミングでノズルを駆動するために、座標変換とタイミング補正を含む一連の設計手順(設計フロー)を明らかにした。

開発した装置を用いて社内模擬生産ラインにて評価を行った結果、1~10 mm 程度の異物を対象とした条件において、検出率および除去率の両面で高い性能が得られることを確認した。また、ベルトコンベヤ速度や吸引ノズル配置を変更した場合における制御パラメータの設計指針についても検討した。本技術は、リサイクル原料に限らず、樹脂ペレット、穀粒・豆類などの農産物、飼料などのバラ物を搬送するラインに適用できる。具体的には、搬送中の異物除去、選別工程の前処理、包装・充填前の異物除去など、ベルトコンベヤ上の流動するバラ物から異物を除去する工程への展開が期待できる。

への対応力と、高い識別性能を両立した異物検査・選別装置の構築が進められている<sup>1)</sup>。本開発では、これらのバラ物中に混入する異物のうち、1~10 mm 程度の微小異物を対象としている。

### 1.2 課題と除去方法の検討

ベルトコンベヤ上を流動するバラ物から1~10 mm 程度の微小異物を自動的に除去するシステムを構成する場合、まずどのような異物の除去方式を採用するかが重要な設計要素となる。代表的な方式としては、以下が挙げられる。

#### 1. エアノズルによる吹き飛ばし方式

光学式選別機などで広く採用されている方式であり、カメラやセンサで検出した異物に対し、下流側で圧縮空気を瞬間的に吹き付けて、ベルトコンベヤ上の流れから外側へはじき出して排出する。粒径が数 mm 以上で、比重や形状の差がある場合には、高速に処理することが可能であり、選別対象の変更にも設定調整で対応しやすい。

#### 2. 機械式フラップ・シュータ方式

コンベヤのベルト末端やシュータ部にゲートやフラップを設置し、その開閉によって落下軌道を切り替える方式である。構造が比較的単純で、大きな塊状物や包装品の選別に適している一方、微小異物を選択的に分離することは難しい。

#### 3. ロボットアーム・ピッキング方式

カメラで検出した異物をロボットアームで把持・除去する方式であり、高い自由度と汎用性を有する。しかし、現状の産業用ロボットのサイクルタイムを考慮すると、ベルトコンベヤ上を高速に流れるバラ物から1~10 mm 程度の微小異物を多数ピックアップする用途には適用が難しい。

本開発で対象とする異物は1~10 mm 程度の小さな粒状物であり、良品と混在した状態でコンベヤ上を流動する。このような条件においては、従来広く用いられてきたエアノズルによる吹き飛ばし方式にも、以下のような課題がある。

- ・ 噴射エアの広がりにより、周辺の良品まで一緒に吹き飛ばしてしまうリスクが高い
  - ・ 小さく比重の大きい異物(例:微小金属片)や、バラ物に埋もれてベルト面近くにある異物は、エアが効きにくく、異物だけをうまく除去できない場合がある
  - ・ 高スループット条件では、連続的なエア噴射により周辺の粒子分布が乱れ、後続の除去にも影響を与え得る
- 一方、吸引ノズル方式は、圧縮空気や真空源を用いて局所的に負圧を発生させ、対象物をノズル内へ取り込む方式である。ベルト面に近接してノズルを配置することで、
- ・ 吸引領域をノズル開口近傍に局所化でき、良品への影響を最小限に抑制することが可能となる
  - ・ 吸い込み方向がベルト面に対してほぼ垂直であるため、微小かつ重い異物に対しても安定した除去が期待できる
  - ・ 配管、バルブ、除去アクチュエータ(吸引ノズル)などの構成が、エアノズル方式と近く、既存のエア供給インフラを容易に流用可能である

といった利点がある。特に、本装置が対象とするような1~10 mm の微小異物を高スループットで処理する場合は、「吹き飛ばし方式」と比較して、条件によっては良品巻き込みを抑えつつ除去率を確保できる方式として、吸引方式が有力な候補となる。加えて、本装置では吸引ノズルを制御するため、異物の座標を出力できる検出方式が必要となる。そこで、複数異物の位置を直接出力でき、対象追加にも追加学習により容易に対応可能な物体検出を採用した。

しかし、今回採用した物体検出・吸引方式を採用した場合でも、システム全体としては以下の技術課題が残る。

#### ・ 微小異物の検出

対象となる異物は1~10 mm 程度の小さなものが多く、背景となるバラ物と外観が類似している場合もある。このような条件下で、カメラ画像から安定に異物を検出するためには、撮像条件(解像度、視野、照明、背景色等)の設計と、物体検出アルゴリズムの適切な選定・学習が必要となる。

#### ・ 異物検出結果に基づく吸引タイミング制御

異物はコンベヤ上を流れており、カメラで撮像した時刻から、実際に吸引ノズルが配置された位置を通過するまでには時間

差が生じる。異物の検出時間、PCとPLC間通信の時間、PLCスキャンタイムなどを考慮し、検出された異物がノズル位置を通過する時刻を高精度に予測する必要がある。

・ 複数異物検出時におけるノズルの制御  
高スループットな生産ラインでは、コンベヤ上に複数の異物が同時に存在する状況が想定される。また、除去性能を高めるために複数のノズルを配置する構成も必要である。このとき、「どのタイミングで、どのノズルを、どの異物に対して動作させるか」を決定する制御ロジックが必要となる。

・ 良品巻き込みと除去率のトレードオフ  
ノズル径や吸引条件を大きくすると異物の除去率は向上するが、同時に良品の巻き込み量も増加する。生産性を損なうことなく異物除去性能を向上させるには、ノズル(径・高さ・配列)と制御(吸引時間・駆動タイミング・吸引圧)の条件を両立させる設計が重要となる。

これらの課題は、異物の種類や業界によらず、「ベルトコンベヤ上を流動するバラ物から微小異物を検出・除去するシステム」全般に共通して存在するものであり、本報告では、吸引ノズル方式を採用した場合の設計手法として整理する。

## 1.3 本開発の目的

本開発の目的は、ベルトコンベヤ上を流動するバラ物を対象として、物体検出アルゴリズムにより得られた異物の検出座標情報を用い、吸引ノズルによる異物除去を実現する装置を試作し、その設計手法および基礎性能を明らかにすることである。

特に、本報告では以下の点に焦点を当てる。

- ・ カメラ画像上の異物の検出座標をコンベヤ座標系およびエンコーダパルスに変換する方法
- ・ 異物の検出時間や通信時間を考慮したノズル駆動タイミングの算出方法
- ・ 複数異物・複数ノズルを対象とした制御ロジックの構成
- ・ 上記を踏まえた社内に構築した模擬生産ラインにおける検出性能・除去性能の評価

これにより、業種に依存しない標準的な「検出座標からノズル制御までの一貫した設計手順」として設計プロセスを確立することを目的とする。

## 2. 異物検出部の検討

### 2.1 要求仕様

本装置における異物検出部は、ベルトコンベヤ上を流動するバラ物中から、1~10 mm 程度の微小異物をリアルタイムに検出する役割を担う。

異物検出部に対する主な要求仕様を以下に示す。

- ・ 対象異物サイズ:おおよそ1~10 mm
- ・ 対象:バラ物中に混入した金属片、樹脂片、異種材料片

など

- ・ 目標検出率:対象異物に対して90%以上
- ・ 処理条件:
  - a. ベルトコンベヤ上のバラ物を流動状態で連続処理
  - b. スループットは生産ラインに応じて変動するが,所定のベルト速度においてリアルタイム処理が可能であること
- ・ 出力仕様:検出した異物について,位置(座標)および種類(クラス)を,後段のノズル制御部で利用可能な情報として出力すること。具体的には,画像上の検出位置に加えて,ノズル制御に用いるコンベヤ座標系およびエンコーダパルス数に換算可能な形で提供できること。

これらの仕様を満たすため,異物検出部は,(1)カメラと照明で画像を取得する撮像部と,(2)取得画像から異物の位置と種類(クラス)を推定する画像処理部(物体検出)で構成した。異物検出部の開発にあたって,物体検出アルゴリズムが異物の検出に適用可能であるか,以下の項目で確認する。

- ① 1~10mmの異物が検出可能
- ② 異物数全体に対する異物の検出率が90%以上

## 2.2 構成

図2-1に異物検出部の構成概略を示す。

- ・ ベルトコンベヤ上方にエリアカメラを設置し,コンベヤ進行方向に対して鉛直下向きに撮像するトップビュー構成とした。
- ・ 均一な照明環境を構築するため,カメラの周囲にリング照明またはパー照明を配置し,ベルト面およびバラ物表面を等方的に照射する構成とした。
- ・ バラ物がカメラの視野内を通過するタイミングで,トリガ信号に従い一定ピッチで静止画を取得する。

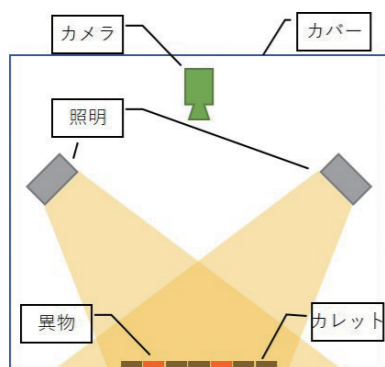


図2-1 検出部概要

本検討では,バラ物の流れがほぼ連続であること,および異物サイズが1~10mm程度と小さいことから,

- ・ 視野全体を一度に撮像できるエリアカメラ方式
- ・ 高画素数センサと単焦点レンズの組み合わせ

を採用した。ラインスキャンカメラ方式に比べて光学設計が簡

易であり,試作段階での視野・解像度の変更が行えるという利点がある。

## 2.3 撮像条件の設計

### (1) 空間分解能と視野

異物を安定して検出するには,最小異物サイズに対して十分な画素数を確保する必要がある。本検討では,対象とする最小異物サイズを1mmとし,これが画像上で少なくとも10画素以上の領域として表現されるように,カメラの視野角と解像度を選定した。

- ・ ベルト幅方向:単一のカメラで処理対象の全有効幅を網羅できるよう,カメラの設置高さを決定した。
- ・ 進行方向:後述するノズル制御の要件に基づき,1フレームあたりの撮像長が過大とならない範囲で視野を決定した。
- ・ 画素当たりの実長:1画素当たりの実長(mm/pixel)は,最小異物サイズ1mmに対して10画素程度の解像度を確保することを指標とし,カメラの画素数と視野に基づき選定した。

これにより,異物と良品との境界が十分に表現され,後段の物体検出アルゴリズムにおいて安定した検出を行える条件とした。

### (2) モーションブラーとシャッタ速度

コンベヤ上のバラ物は一定速度で移動しているため,露光時間が長い場合にはモーションブラーが生じ<sup>2)</sup>,異物の輪郭が不明瞭になる。そこで,本検討では「露光中の搬送により画像が流れて写る動体ブレ(以下,「ブレ」と称する)を画像上で1ピクセル以内に抑える」ことを目標として露光時間を設定した。

ベルト速度を $v$  [mm/s],露光時間を $T$  [s],カメラのベルト進行方向の画素数を $N$  [pixel],対応する実視野長を $L$  [mm]とすると,

- ・ 1ピクセルあたりの実長は

$$\Delta x = \frac{L}{N} \text{ [mm/pixel]}$$

- ・ 露光中の像の移動量は

$$\Delta L = vT \text{ [mm]}$$

で表される。

本検討では,

$$\Delta L = \Delta x$$

すなわち

$$vT = \frac{L}{N}$$

となるように,想定する最大ベルト速度に対して許容露光時間 $T$ の上限を算出し,その範囲内で露光時間を設定した。これにより,モーションブラーが画像上で1ピクセル以内に収まり,実質

的に輪郭の劣化を無視できる条件とした。

露光時間短縮に伴う画像の明るさの低下については,照明光量の増加やカメラゲインの調整により補償(以下,「ゲイン補償」と称する)することで,異物と背景間の十分なコントラストを確保した。

### (3) 照明条件

異物の種類や材質により,表面反射や色味が大きく異なるため,照明条件および背景色は検出性能に大きく影響する。

- ・ 照明方式:均一な照度分布が得られるよう拡散照明を基本とし,必要に応じて斜光照明や偏光フィルタを組み合わせることで,金属片などのハイライトや鏡面反射を抑制する<sup>3)4)</sup>。
- ・ 背景色:バラ物および代表的な異物の色調を事前に確認し,双方と十分なコントラストが得られるベルト色(例:黒,青,白など)を選定する。
- ・ 画像コントラストの調整:異物と背景との輝度差・色味が確保されるように,カメラの露光量,ゲイン,ホワイトバランスを調整する。

これらの条件については,社内模擬生産ラインにおいて複数パターンの比較検討を実施した。評価指標として異物検出率および誤検出率を用い,双方の観点から最適な組み合わせを選定した。

## 2.4 物体検出アルゴリズム

本装置では,撮像した画像から異物の位置とクラス(異物の種類)を自動的に推定するために,深層学習に基づく物体検出アルゴリズムを用いた。物体検出アルゴリズムは,入力画像に対して複数の候補領域を生成し,各領域について「異物であるか否か」および「異物のクラス」を同時に推定するものである。

本検討で採用したアルゴリズムは,畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network; CNN)をバックボーンとし,複数の解像度の特徴マップを統合した上で,画素ブロックごとに境界ボックスとクラス確率を出力するワンステージ型の構成とした。これにより,高い検出精度を維持しつつ,ベルトコンベヤ上の連続画像に対してリアルタイム処理が可能な推論速度を確保した。

図2-2に物体検出アルゴリズムの処理概要の概略を示す<sup>5)</sup>。

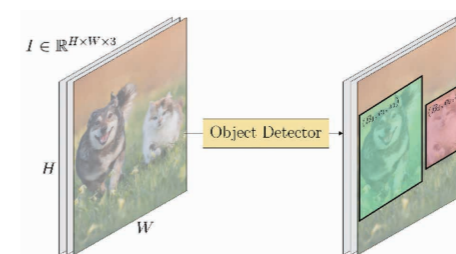


図2-2 物体検出アルゴリズムの処理概要<sup>2)</sup>

1. 前処理  
撮像画像を所定の入力サイズにリサイズし,画素値の正規化を行う。必要に応じて,明るさ・コントラストの補正やノイズ低減フィルタを適用する。
  2. 特徴抽出  
CNN バックボーンにより,入力画像からエッジやテクスチャ,形状などの特徴量を多段に抽出する。
  3. 検出ヘッドによる候補生成  
複数解像度の特徴マップ上で,位置ごとに境界ボックス候補と,それが異物である確率およびクラスごとの確信度を推定する。
  4. 後処理(しきい値処理および Non-Maximum Suppression)  
確信度が所定のしきい値以上の候補のみを残し,重なりが大きい候補は Non-Maximum Suppression により統合することで,最終的な検出結果を得る。
- 最終的な出力は,画像座標系における異物の境界ボックス $(x_{min}, y_{min}, x_{max}, y_{max})$ とクラスラベルおよび確信度である。本報告では,これらの境界ボックス中心座標を「検出座標」とし,後段でコンベヤ座標系およびエンコーダパルスへ変換することで,吸引ノズル制御に利用している。

## 2.5 検出性能評価

本節では,構築した異物検出部の性能評価について述べる。評価は,静止画像を用いたオフライン評価と,ベルトコンベヤを実際に稼働させた状態で取得した画像を用いたオンライン評価の2段階で実施した。

### (1) 評価指標

異物検出性能の定量評価には,主に以下の指標を用いた。

#### ・検出率(Detection Rate)

評価対象とした異物のうち,検出アルゴリズムにより正しく検出されたものの割合と定義する。

$$\text{検出率}[\%] = \frac{\text{正しく検出された異物数}}{\text{評価対象となる異物数}} \times 100$$

#### ・誤検出率(False Detection Rate)

アルゴリズムが出力した検出結果のうち,実際には異物が存在しないもの(誤検出)の割合と定義する。

$$\text{誤検出率}[\%] = \frac{\text{誤って検出された異物数}}{\text{検出総数}} \times 100$$

必要に応じて,適合率・再現率や平均適合率(Average Precision)といった指標も参考値として算出し,しきい値変更時の挙動確認に利用した<sup>6)</sup>。



(2) オフライン評価

まず、社内模擬生産ラインで撮像した静止画像に対して、アノテーション作業で正解データを作成し、オフライン評価を行った。評価画像は、異物サイズや配置条件が異なる複数パターンから構成し、各パターンで検出率および誤検出率を算出した。

その結果、実運転を想定した標準条件において、対象とする1~10 mm程度の異物に対し、目標としていた検出率90%以上を達成できることを確認した。また、誤検出率についても、後段の吸引除去処理に支障をきたさない水準に抑制されていることを確認した(第5章)。

(3) オンライン評価

次に、ベルトコンベヤを実際に稼働させ、バラ物を連続的に供給した状態でオンライン評価を行った。所定のベルト速度で一定時間運転し、その間に投入した異物数と検出された異物数から検出率を算出した。

オンライン評価では、照明条件のわずかな変動や、バラ物の重なり・堆積状態の変化など、オフライン評価には含まれない要因が加わるが、実運転を想定した標準条件においてはオフライン評価と同等水準の検出率が得られた。これにより、本検討で設計した撮像条件および物体検出アルゴリズムが、実運転環境においても有効に機能することを確認した(第5章)。

3. 検出座標からノズル制御までの設計

本章では、第2章で詳述した異物検出部より出力される検出座標に基づき、吸引ノズルの駆動タイミングを決定するまでの一連の設計手法について述べる。具体的には、画像座標系からコンベヤ座標系・エンコーダパルスへの変換、システム遅延を考慮したタイミング算出、および複数異物・複数ノズルを対象とした制御ロジックについて整理する。

3.1 座標系の定義

本装置では、異物の位置を扱う座標系として、以下の3種類を定義する。

- ・ 画像座標系  $(u, v)$   
エリアカメラの画素配列に対応する座標系であり、画素インデックスを用いて表現する。水平方向の画素位置を  $u$  [pixel]、垂直方向の画素位置を  $v$  [pixel] とする。
- ・ コンベヤ座標系  $(X, Y)$   
ベルトコンベヤ上の実空間における位置を表す座標系である。ベルト進行方向を  $X$  [mm]、ベルト幅方向を  $Y$  [mm] とし、カメラ視野内の基準位置を原点とする。
- ・ エンコーダ座標  $(E)$   
ベルト進行方向に取り付けたエンコーダから取得されるパルス数に対応する1次元の座標系である。エンコーダのパルス数を  $E$  [pulse] とし、ある基準位置を通過した時点を  $E = 0$  と定義する。  
物体検出アルゴリズムの出力である境界ボックス中心座標

は画像座標系  $(u, v)$  で与えられる。本章では、これをコンベヤ座標系  $(X, Y)$  に変換し、さらにエンコーダ座標  $E$  と組み合わせ、吸引ノズルの駆動タイミングを算出する手順を示す。

3.2 画像座標からコンベヤ座標への変換

カメラがベルトコンベヤ上方に固定されていることから、カメラ視野内の平面は、コンベヤ面とはほぼ平行であるとみなせる。このため、画像座標系  $(u, v)$  とコンベヤ座標系  $(X, Y)$  の間には、射影変換(ホモグラフィ)またはアフィン変換による対応関係を定義できる。

本検討では、カメラ視野内に既知寸法のキャリブレーションパターンを配置し、パターン上の複数点について  $(u, v)$  と  $(X, Y)$  の対応を取得した上で、以下のような線形モデルにより座標変換式を求めた。

・ コンベヤ座標系

$$X = a_{11}u + a_{12}v + a_{13}$$

$$Y = a_{21}u + a_{22}v + a_{23}$$

ここで、 $a_{ij}$  はキャリブレーションにより求めた係数である。キャリブレーション時には、ベルト幅方向の両端および進行方向の複数位置にマーカを配置し、画像上での画素位置との対応づけを行うことで、視野内全域にわたって誤差が許容範囲内に収まるようパラメータを決定した。

物体検出アルゴリズムから得られた境界ボックス中心座標  $(u_c, v_c)$  について、上式を適用することで、コンベヤ座標系における異物位置  $(X_c, Y_c)$  を求める。

3.3 コンベヤ移動とエンコーダパルスへの変換

吸引ノズル制御においては、異物が「ノズル直下を通過する時刻」を高精度に予測する必要がある。本装置では、コンベヤ進行方向に取り付けたエンコーダからパルス信号を監視し、その総パルス数をベルトの移動距離として変換・管理する構成とした。

エンコーダの仕様を以下のように定義する。

1回転当たりのパルス数:  $P_{rev}$  [pulse/rev]  
駆動ローラの外周長:  $C$  [mm]

このとき1パルス当たりのベルト移動  $\Delta X_{enc}$  [mm/pulse] は、

$$\Delta X_{enc} = \frac{C}{P_{rev}}$$

となる。

カメラの撮像ライン(検出ライン)と吸引ノズル位置との間の距離を、コンベヤ座標系において  $D$  [mm] とする。ある時刻に検出された異物が、検出時点でコンベヤ座標  $X = X_c$  を有するとき、ノズル直下を通過する時点のコンベヤ座標は  $X = X_c + D$  となる。

ここで、検出時点のエンコーダ値を  $E_{det}$  [pulse] とすると、ノズ

ル位置を通過する時点のエンコーダ目標値  $E_{noz}$  は、以下のよう

$$E_{noz} = E_{det} + \frac{D}{\Delta X_{enc}}$$

実装上は、 $\frac{D}{\Delta X_{enc}}$  を四捨五入した整数パルス数として扱うことで、PLC上での比較処理を簡略化している。

3.4 システム遅延を考慮したノズル駆動のタイミングの算出

実際のシステムでは、カメラ撮像からノズル駆動信号出力までの間に、以下のような遅延要素が存在する。

- ・カメラの読み出し時間および画像転送時間:  $T_{cam}$
- ・物体検出アルゴリズムの処理時間:  $T_{det}$
- ・PCとPLC間の通信遅延:  $T_{com}$
- ・PLC内のスキャンタイムおよび出力反映時間:  $T_{plc}$

これらを合算した値をシステム総遅延時間として、

$$T_{sys} = T_{cam} + T_{det} + T_{com} + T_{plc}$$

となる。

実際には、システム総遅延  $T_{sys}$  を事前に測定し、ベルト速度ごとに  $\Delta X_{sys}$  を算出しておき、PLC側のパラメータとして設定することで、さまざまな運転条件下でノズル駆動タイミングが一致するように調整した。

3.5 複数異物・複数ノズルに対する制御ロジック

本装置では、高スループットな処理を実現するため、ベルト幅方向に複数の吸引ノズルを配列し、同時に複数の異物が存在する場合にも対応できる構成とする。

(1) ノズル担当範囲の定義

ベルト幅方向のコンベヤ座標  $Y$  を、ノズル本数に応じて複数の担当領域に分割し、各異物の  $Y$  座標に応じて担当ノズルを割り当てる

(2) キュー管理による時系列制御

各ノズルにおいて、今後通過予定の異物に対応するエンコーダ目標値  $E_{trg}$  を時系列に並べたキューとして管理する。PLC側では、エンコーダ現在値が各キューの先頭に格納された値に到達した時点で、対応するノズルを一定時間ONする。

(3) 重なり・競合の処理

同一ノズルに対して短時間に複数の吸引要求が発生した場合、電磁弁を高速にON/OFFさせることは、応答時間や機械的寿命の観点から望ましくない。本装置では、1回の吸引要求に対する電磁弁の駆動時間を  $T_{on}$  [ms] と定め、時刻差が  $T_{on}$  未満である複数の要求は1つの連続パルス(連続ON信号)に統合する方式とした。

3.6 ノズル駆動信号生成

ノズル駆動信号は、エンコーダ現在値  $E_{now}$  と、キューに格納された目標値  $E_{trg}$  との比較に基づいて生成する。

・ノズル  $j$  に対するON条件の一例:

$$E_{trgj} - \Delta E_{pre} \leq E_{now} \leq E_{trgj} + \Delta E_{post}$$

ここで  $\Delta E_{pre}$ 、 $\Delta E_{post}$  は、ノズルの応答時間や吸引有効範囲を考慮した許容誤差パルスである。この範囲内に入った時点でノズルをONし、所定のON時間経過後にOFFする。ON時間は、ノズル開口径や吸引流量、ベルト速度との関係から決定し、異物がノズル開口部に入っている間に十分な吸引時間を確保できるよう設定した。これらのパラメータについては、第4章以降に述べる評価結果を鑑み、検出感度の向上と良品巻き込み率の抑制というトレードオフの関係を評価し、最適な値を設定した。

4. 異物除去部の検討

4.1 要求仕様

本装置における異物除去部は、第2章および第3章で述べた異物検出結果とノズル制御ロジックに基づき、ベルトコンベヤ上を流動するバラ物中から1~10 mm程度の微小異物を吸引除去することを目的とする。主な要求仕様を以下に整理する。

- ・ 対象異物:  
バラ物中に混入した金属片、樹脂片、ガラス片などの1~10 mm程度の微小異物
- ・ 目標除去率:  
検出された異物に対して90%以上
- ・ 歩留まり(良品残存割合):  
除去対象外のバラ物(良品)が吸引される量を、ライン全体の処理量に対して許容範囲内に抑えること
- ・ 処理条件:  
所定のベルト速度・スループットにおいて連続運転が可能であること
- ・ 入出力仕様:  
第3章で算出されたノズル駆動タイミング(エンコーダパルス情報)を入力とし、各ノズルのON/OFF信号を指定のタイミングで出力できること。  
これらの要求を満たすため、本装置の異物除去部は、複数の吸引ノズル、電磁弁、負圧発生装置(エジェクタまたは真空ポンプ)、およびダスト回収部から構成される。

4.2 構成

図4-1に異物除去部の構成概略を示す。

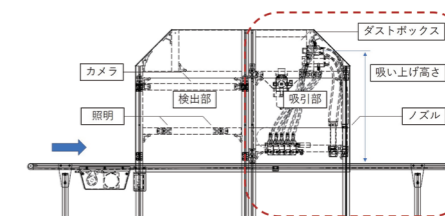


図4-1 異物除去部概要

- ・ ベルトコンベヤ幅方向に複数の吸引ノズルを等ピッチで配置し、各ノズルが担当する幅方向領域に割り当てた。
  - ・ 各ノズルは短い配管を介して電磁弁に接続し、電磁弁の上流側には共通の負圧マニホールドを設けた。
  - ・ 負圧マニホールドは、エジェクタまたは真空ポンプに接続されており、ノズル開口部近傍で十分な流量と負圧を確保するため、配管径および配管長を決定した。
  - ・ 吸引された異物および一部のバラ物は、ダストボックスまたはサイクロン式集塵機に回収される構成とした。
- ノズル先端はベルト面に対してほぼ垂直となるように固定し、ノズル開口とベルト面との距離(スタンドオフ)は数 mm 程度に設定する。これにより、吸引領域をノズル開口近傍に局所化し、良品への影響を抑えつつ異物の確実な捕捉を実現する。

#### 4.3 吸引ノズルの仕様と吸引条件の検討

吸引方式による異物除去性能は、ノズル径、スタンドオフ、負圧レベル、吸引時間  $T_{on}$ 、ベルト速度など、複数のパラメータに依存する<sup>7)</sup>。本開発装置では、以下の手順で仕様検討を行った。

##### (1) ノズル径とスタンドオフ

対象とする異物サイズ 1~10 mm を想定し、ノズル径が小さすぎる場合には異物が開口部に噛み込みやすく、大きすぎる場合には良品巻き込み量が増加することが懸念された。このため、複数候補のノズル径について、以下の条件で比較試験を行った。

- ・ ベルトを停止させた状態で、ノズル直下近傍に異物を配置
- ・ 所定の負圧および吸引時間  $T_{on}$  でノズルを駆動し、異物の吸引可否を確認
- ・ 良品に相当するバラ物を増減させた複数条件で、巻き込み量を観察

##### (2) 負圧レベルと吸引時間

本装置では電磁弁 ON 時の負圧レベルと ON 時間  $T_{on}$  を組み合わせて異物除去性能を調整している。負圧レベルを高く、 $T_{on}$  を長く設定すれば、除去率は向上する傾向にあるが、同時に良品の巻き込み量が増加し、歩留まりが低下する。

##### (3) ベルト速度との関係

ベルト速度が増加すると、ノズル直下を異物が通過している時間が短くなるため、必要な  $T_{on}$  はベルト速度に依存する。本開発では、第3章で示したタイミング設計に基づき、ベルト速度ごとにノズル有効幅と通過時間を算出し、異物がノズル開口部に入っている期間全体をカバーできるように  $T_{on}$  を設定した。

実装上では、 $T_{on}$  を固定値としつつ、エンコーダ許容範囲  $\Delta E_{pre}$ 、 $\Delta E_{post}$  を調整することで、ベルト速度の変動に対しても適切な吸引タイミングが確保できるようにしている。

#### 4.4 除去性能評価

本節では、異物除去部単体での評価結果の概要を述べる。詳細な数値や条件ごとの比較は、第5章でのシステム評価と合わせて整理する。

##### (1) ノズル単体評価

まず、ベルトを停止または低速で運転させた状態で、ノズル直下近傍に異物を配置し、ノズル単体での吸引性能を評価した。

- ・ 条件A:ノズル直下(中心付近)に異物を配置
- ・ 条件B:ノズル開口端から数 mm 離れた位置に異物を配置
- ・ 条件C:良品に相当するバラ物の厚みを増加させ、異物が部分的に埋没した状態

各条件に対して、負圧レベルと  $T_{on}$  を変化させ、異物が吸引される割合および良品巻き込み量を記録した。その結果、試作したノズル仕様において、条件AおよびBでは目標とする除去率を達成できる設定範囲が存在すること、条件Cのように異物がバラ物中に埋没した場合でも、 $T_{on}$  を適切に設定することで一定の除去性能が得られることを確認した(第5章)。

##### (2) オンライン時の除去性能

次に、ベルトコンベヤを実運転に近い条件で連続稼働させ、バラ物を供給した状態で除去性能を評価した。この試験では、第3章までで設計した検出・ノズル制御ロジックと、第4章で決定したノズル仕様・吸引条件を組み合わせ、検出された異物が実際に除去される割合を測定した。

実運転を想定した標準条件においては、検出部の検出率が 90 % 以上であることを前提として、除去率についても目標値を満たすことを確認した。また、良品巻き込み量についても、定量的な計測結果から、ライン全体の処理量に対して許容範囲内に抑えられていることを確認した(第5章)。

これらの結果から、本開発で検討した吸引方式およびノズル仕様は、1~10 mm 程度の微小異物を対象としたベルトコンベヤ上の異物除去に対して有効であり、第3章における検出・制御アルゴリズムとの連携により、検出率、除去率、および良品巻き込みのトレードオフを最適化したシステム構成が実現可能であることを明らかにした。

#### 5. 評価試験

本章では、これまで述べた異物検出部および吸引除去部について、社内模擬生産ラインを用いて実施した評価試験の内容と結果を示す。

##### 5.1 評価対象ワークおよび試験環境

本検討では、ベルトコンベヤ上を流動するバラ物中に混入した 1~10 mm 程度の微小異物を対象とした。評価に用いた代表的なワークを図5-1、図5-2に示す。

- ・ バラ物:リサイクル原料を模擬したビニル片
- ・ 異物:金属片,アルミ片,粒状土



図5-1 バラ物(ビニル片)



図5-2 異物(左から金属片,粒状土,アルミ片)

表5-1 試験結果(オフライン評価)

対象	偏光フィルタ無		偏光フィルタ有			
	白色ベルコン		青色ベルコン		青色ベルコン	
	検出率(%)	誤検出率(%)	検出率(%)	誤検出率(%)	検出率(%)	誤検出率(%)
金属片	93.3	13.3	100.0	0.0	93.3	0.0
アルミ片	100.0	16.7	100.0	6.3	80.0	36.8
粒状土	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0

##### 5.2.2 ハレーション・グレアと偏光板の効果

金属片およびアルミ片を含む条件では、偏光フィルタを用いない場合は、ベルト面および異物表面でハレーション・グレアが発生し、一部の異物が背景と同等以上の輝度となることで、検出漏れや誤検出が増加する傾向が確認された。特に、光源とカメラの入射角の関係によっては、異物の輪郭が飽和し、境界ボックスの位置が不安定になるケースが見られた。

これに対し、照明側とカメラ側に偏光フィルタを配置することで、ハレーション成分が抑制され、異物と背景との輝度差・色差が向上した。その結果、金属片条件では検出率が向上し、誤検出率が低減することを確認した(表5-1)。アルミ片についても誤検出率の低減が見られた一方で、背景色による影響が相対的に大きく、青色ベルト条件では検出率低下および誤検出率増加が確認された。これは、異物の代表的な色調・反

#### 5.2 異物検出部のオフライン評価

##### 5.2.1 試験内容

まず、ベルトを停止させた状態で撮像した静止画像を用いて、異物検出部のオフライン評価を行った。評価では、主に以下の要因が検出性能に与える影響を確認した。

- ・ 背景(白色ベルト/青色ベルト)
- ・ 偏光板の有無

各条件について、異物を所定数ランダム配置した画像を撮像し、アノテーション作業で正解データを作成することで、検出率および誤検出率を算出した。背景色および偏光条件ごとの結果を表5-1に示す。

射特性と背景色の組み合わせにより、コントラストが十分に確保できない条件が生じるためと考えられる。

以上の結果から、オフライン評価においては、偏光フィルタの適用により反射に起因する誤検出を抑制可能であることが示された。また、背景色については、対象異物とのコントラストを十分に確保できる組み合わせを選定する必要があることが明らかとなった。

表5-2 試験結果(オンライン評価)

露光時間 ベルコン速度	500(μs)		1000(μs)		2500(μs)	
	検出率(%)	誤検出率(%)	検出率(%)	誤検出率(%)	検出率(%)	誤検出率(%)
9(m/min)	83.3	0.0	98.3	1.6	95.0	6.6
14(m/min)	83.3	2.0	93.3	1.8	93.3	6.7
20(m/min)	81.7	3.9	93.3	1.8	95.0	8.1

5.3 異物検出部のオンライン評価

5.3.1 試験内容

つぎに、ベルトコンベヤを実際に稼働させ、バラ物を連続供給した状態でオンライン評価を行った。なお、オンライン評価は、前節(5.2)のオフライン評価において総合的に検出性能が良好であった「白色ベルト+偏光フィルタ有」の条件を採用して実施した。評価パラメータとして、以下を変更した。

- ・ベルト速度:9~20 m/min の複数条件
- ・露光時間:2.3節で述べた「ブレ量 1ピクセル以内」の条件を満たす前後の値

各条件について、一定時間運転中に投入したバラ物内の異物数と、検出アルゴリズムが出力した検出結果から検出率を算出した。結果を表5-2に示す。

5.3.2 ベルト速度・露光時間と検出率

オンライン評価では、露光時間の設定により検出率が変動することを確認した。露光時間を長く設定した場合、高速側のベルト速度条件において、異物輪郭が進行方向に伸びるモーションブラーが確認された。このとき、一部の異物では境界ボックスが実際よりも大きく推定される、あるいは異物が背景と一体化して検出漏れとなるケースが見られ、検出率が低下した。また、ブレにより異物の形状が崩れることで、誤検出率が増加する傾向も確認された。

一方で、露光時間を短くすぎた場合には、画像が暗くなり、異物と背景の輝度差が低下することで検出率が低下した。具体的には、露光時間を短縮した条件において、照明光量やゲイン補償が十分でない場合、異物の輪郭やテキスト情報が弱まり、検出漏れが増加する傾向が見られた。したがって、オン

ライン運転条件における露光時間は、「モーションブラー抑制」と「画像の明るさ(S/N)の確保」の両立が必要である<sup>8)</sup>。

モーションブラーの許容条件は、2.3節で示した関係式に基づき、「進行方向の像の移動量が 1 ピクセル以内」として設定した。

本評価では、上式で算出される許容露光時間を基準としつつ、露光時間短縮による暗画像化を考慮し、照明光量およびゲイン補償により画像の明るさを確保した。その結果、露光時間を「ブレ量 1 ピクセル以内」に収める範囲で適切に設定することで、ブレ起因の検出率低下を抑制できる一方、過度な露光時間短縮は暗画像化により検出率低下を招くことが分かった。以上の結果から、オンライン評価においては、想定される速度域に対してモーションブラーの許容条件を満たす最長の露光時間を基本設定とし、光量不足が生じる場合には照明の強化やゲイン補正によって輝度を確保する手法が有効である。

5.4 吸引除去部の評価

本節では、吸引ノズルを用いた除去部について、吸引時間およびノズル径を変更した場合の「除去率」と「歩留まり」への影響を評価した結果を示す。

5.4.1 試験内容

吸引除去部の基本性能を把握するため、吸引圧を一定(0.4 MPa)に固定し、ノズル径および吸引時間を変更して除去率と歩留まりを計測した。なお、本試験は、前節のオンライン評価において検出性能が良好であった条件を基準とし、ベルト速度 9 m/min、露光時間 1000 μs を固定して実施した。ノズル径は φ10 mm および φ20 mm の 2 条件とし、吸引時間は 50 ms、100 ms、200 ms の 3 条件で比較した。

本評価では、異物を吸引除去できた割合を除去率、異物除去後に良品として残存した割合を歩留まりとして整理した。

5.4.2 試験結果

表5-3 に吸引時間・ノズル径ごとの除去率および歩留まりを示す。

5.4.3 吸引時間・ノズル径と除去率/歩留まりの関係

吸引時間を長くすると除去率は向上する一方で、歩留まりは低下する傾向が確認された。これは吸引時間の増加により異物の捕捉性が高まる反面、周辺の良品も吸引されやすくなるためである。

また、ノズル径を φ20 mm に拡大した場合、吸引範囲が広がることで歩留まりが大きく低下し、特に 200 ms 条件では歩留まりが 50 % 程度まで低下した。一方で除去率は吸引時間の増加に伴い向上するものの、φ10 mm 条件と比較して歩留まり低下の影響が大きい。

以上より、本試験範囲では、除去率と歩留まりのバランスの観点からは φ10 mm 条件が有利であり、特に 100 ms 条件は除去率 100 % を達成しつつ歩留まりも一定水準で維持可能な最適条件として位置付けられる。

6. 考察およびまとめ

本章では、第5章の評価結果を踏まえ、本装置における異物検出~吸引除去までの成立条件と設計上の要点を整理し、今後の課題を述べる。

6.1 異物検出部に関する考察

(1) ハレーション・グレアに対する対策指針

オフライン評価の結果より、金属片やアルミ片のように鏡面反射成分を持つ異物では、照明条件によってはハレーション・グレアが支配的となり、検出漏れおよび誤検出が増加する傾向が確認された。これに対し、偏光フィルタを用いることで反射成分が抑制され、異物と背景のコントラストが改善し、検出率向上および誤検出率低下に有効であることが実証された。

一方で、背景条件は異物の反射特性や色調との組み合わせにより、その検出能力が著しく変動する。実用段階においては、対象異物との高コントラスト化と、鏡面反射等による輝度飽

和の抑制を両立する背景色の選定が必要である。

(2) モーションブラーと暗画像化のトレードオフ

オンライン評価の結果より、露光時間が長い条件では高速側でモーションブラーが発生し、検出率低下および誤検出率増加につながることを確認された。これに対し、露光時間を短縮することでブレ起因の性能低下は抑制できるが、短縮しすぎると画像が暗くなり、S/N低下により検出率が低下することが確認された。

したがってオンライン運転時の露光時間は、「ブレ量 1 ピクセル以内」を満たす範囲で可能な限り長い値を基本とし、明るさは照明光量やゲイン補償で確保することが有効である。加えて、コンベヤの運転速度範囲が広い場合は、速度に応じた露光・照明条件の段切替え(レシピ化)も有効な手段となる。

6.2 吸引除去部に関する考察

(1) 吸引時間の影響

吸引時間の増加により除去率は向上する一方で、歩留まりは低下する傾向が確認された。これは吸引時間を長くするほど、異物に加えて周辺の良品も吸引されるためである。従って、除去率のみを追うのではなく、歩留まりを含めた総合指標で吸引時間を決定する必要がある。

(2) ノズル径の影響

ノズル径を大きくすると吸引範囲が広がり除去率は向上しやす一方で、歩留まり低下が顕著となる傾向が確認された。本試験範囲では、φ10 mm 条件が φ20 mm 条件と比較して歩留まり面で有利であり、除去率と歩留まりのバランスの観点から有効な選定肢となることが示唆された。

実用化においては、対象物の粒径分布・堆積状態・ノズル本数(担当幅)を含めて最適化する必要があり、ノズル径単体ではなく「ノズル径×担当幅×吸引時間×負圧」の組み合わせとして整理することが重要である。

6.3 検出装置と除去装置を統合したシステムとしての設計指針

本開発で得られた知見を、統合システムとしての設計指針として以下に整理する。

- (1) 反射対策: 偏光フィルタと背景色選定により、鏡面反射由来の検出漏れ・誤検出を抑制する。
- (2) ブレ対策: 運転速度に対しブレ量 1 ピクセル以内となる露光時間を基本とし、暗画像化は照明やゲイン補償で対応する。
- (3) 吸引条件: 除去率と歩留まりのトレードオフを前提に、ノズル径と吸引時間を組合せて最適化する。
- (4) 制御成立性: 複数異物・複数ノズル制御では、吸引要求の重なり処理(統合ルール)を設け、電磁弁の応答限界・寿命を考慮した運用条件を決定する。

表5-3 吸引時間・ノズル径による除去率および歩留まり

吸引時間 ノズル径	50(ms)		100(ms)		200(ms)	
	除去率(%)	歩留まり(%)	除去率(%)	歩留まり(%)	除去率(%)	歩留まり(%)
φ 10 (mm)	75.0	89.7	100.0	87.4	100.0	84.7
φ 20 (mm)	60.0	69.3	100.0	60.8	95.0	49.3

MEMO

6.4 今後の課題

(1) 対象異物・バラ物条件の拡張

本評価は代表的な異物・バラ物条件で実施したが、材質・色・形状が異なる異物や、粒径分布・堆積厚みが増える条件に対する再現性確認が必要である。特に、異物が埋没する条件や背景テクスチャが複雑な条件では、検出・除去双方で性能低下が生じ得るため、追加評価を行う。

(2) 長時間連続運転での信頼性評価

システムの長期安定稼働を実現するうえで、電磁弁の連続駆動、配管内の粉塵堆積、ノズル詰まり、負圧源の安定性など、長時間運用における信頼性課題を整理し、保守点検周期・清掃性・フィルタ構成を含めた設計検討が必要である。

(3) 評価指標の拡充

従来の検出率・誤検出率・除去率・歩留まりに加えて、「異物混入割合に対する良品損失量(質量)」「処理量あたりのエ

ア消費」「誤吸引の回収率」「運転速度変動時の追従性」などを含めた総合評価体系を整備し、導入効果を定量的に示す必要がある。

6.5 まとめ

本報告では、物体検出アルゴリズムにより得られた検出座標をコンベヤ座標系およびエンコーダパルスへ変換し、遅延要素を考慮して吸引ノズルを駆動する一貫設計手法を明らかにした。評価の結果、反射対策(偏光フィルタ・背景色)およびプレ対策(露光時間の最適化)が検出性能に大きく寄与すること、また吸引除去においてはノズル径・吸引時間の組合せにより除去率と歩留まりの最適点が存在することを確認した。以上より、本手法はベルトコンベヤ上のバラ物から微小異物を検出・除去する用途に対して有効であり、撮像条件および吸引条件の最適化により各種プロセスへの展開が期待できる。

参考文献 REFERENCES

- 1) 笠原亮介. 特集 PART1 画像識別技術の基礎と機械学習による外観検査技術. 機械設計. 2020. vol.64. no.10. p.6-24
- 2) キーエンス. 基礎から学ぶ画像処理の教科書
- 3) 増村茂樹. マシンビジョン画像処理システムにおける新しい照明技術 -画像処理システムにおける照明の役割と設計基礎, およびその規格化-. 精密工学会誌. 2013. vol.79. no.11. p.1003-1008
- 4) 東芝テリー. "マシンビジョンにおける光と偏光について".  
<https://www.toshiba-teli.co.jp/technology/technical/t0011-Reflection-Polarization.htm>  
(参照 2025-11-16)
- 5) Malagoli, E., & Di Persio, L.: "2D Object Detection: A Survey", Mathematics, 13(6), 893, 2025.  
<https://www.mdpi.com/2227-7390/13/6/893>  
(参照 2025-11-16)
- 6) COCO Dataset. Object Detection Evaluation Metrics (mAP, AP, IoU).  
<https://cocodataset.org/#detection-eval>
- 7) EuroTech. "真空発生器の種類について"  
<https://eurotech-vacuum-technologies.com/ja/types-of-vacuum-generators-explained/>
- 8) PyImageSearch. Mean Average Precision (mAP) Using the COCO Evaluator.  
<https://pyimagesearch.com/2022/05/02/mean-average-precision-map-using-the-coco-evaluator/> (参照 2025-12-11)

筆者紹介



安田 真也

YASUDA SHINYA

2023年入社

R&Dセンター技術開発部  
開発3課 DX技術ユニット